

ANÁLISE DE FALHA EM PARAFUSOS ESTRUTURAIS DE MÁQUINAS DE ENSAIO DE FADIGA DE TUBOS FLEXÍVEIS*

Brunno Fontoura Campanharo¹
Pablo Altoé Amorim²

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo o estudo do fenômeno de fadiga realizado nos parafusos ISO 4017, M42x160 da classe 12.9, atuando na tampa de guilhotina de uma máquina de ensaio de fadiga em tubulações flexíveis. Foram realizadas análises de fractografia e metalógrafia, inspeção visual, verificação da classe do parafuso e ensaio de dureza. Todos esses testes, foram realizados com a finalidade de encontrar o motivo da causa e eliminar o mesmo. Os resultados obtidos apontam que esses elementos falharam por motivo de fadiga. Foi concluído ainda, que o acabamento superficial durante a fabricação desses parafusos fornecidos, não é adequado para aplicações onde o fenômeno fadiga, é um fator complicador no projeto.

Palavras-chave: Fadiga; Fadiga em parafusos; Análise fractografica e metalúrgica.

STRUCTURAL SCREW FAILURE ANALYSIS OF FLEXIBLE TUBING FATIGUE TEST MACHINES

Abstract

The present paper had as objective the study of the fatigue phenomenon realized in the screws ISO 4017, M42x160, class 12.9, acting in a guillotine cover of a fatigue test machine in flexible tubing. It was performed fractography and metallography analyzes, visual inspection, screw class verification and hardness test. All of these tests were conducted to find the cause and eliminate it. The results obtained indicate that these elements failed due to fatigue. It was further concluded that the surface finish during the manufacture of these screws provided, is not suitable for applications where the phenomenon fatigue, is a complicating factor in the design.

Keywords: Fatigue; Screw Fatigue; Fractography and metallography analyzes.

¹ Engenheiro Mecânico, Centro Universitário FAESA, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Me., Professor, Centro Universitário FAESA, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, os projetos e as construções de produtos atuais, vão de simples aparelhos até sistemas supercomplexos, esses projetos devem apresentar boa confiabilidade operacional o que resulta em disponibilidade do equipamento, redução de custos de manutenção, redução de riscos pessoais, riscos patrimoniais e riscos ambientais.

Nas indústrias petrolíferas, qualquer falha de equipamento pode gerar grandes perdas na produção e principalmente danos ao meio ambiente. Por isso, no processo de fabricação de tubos flexíveis, vários ensaios de qualificação em condições extremas de serviço são realizados nos produtos, dentre esses, existe o ensaio de fadiga no modo tração-flexão. Esse ensaio consiste em fadigar o tubo durante um tempo programado, e em seguida analisar os danos causados na tubulação, assim com os resultados em mãos, a empresa consegue garantir a confiabilidade dos seus produtos para seus clientes.

Essas máquinas de ensaios, ao realizar os esforços de tração-flexão nos tubos flexíveis, os próprios elementos que as compõe sofrem fadiga, como por exemplo, os parafusos de união da estrutura.

Para qualificar os tubos flexíveis, são necessários testes de fadiga em torno de 6 meses a 1 ano. Quando ocorre uma falha nas máquinas de ensaio, existem vários fatores prejudiciais para a empresa: parada do maquinário para substituição do elemento danificado; possibilidade de interferir nos resultados do ensaio; risco de acidente na área; colapso na estrutura do maquinário entre outros.

Esse artigo visa determinar a(s) possível(eis) causa(s) que levou a falha dos parafusos de fixação de uma máquina de fadiga e avaliar através dos resultados das análises fractográficas e metalúrgicas a melhor maneira de eliminar essa(s) falha(s), assim garantindo maior disponibilidade do sistema.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

O parafuso analisado, classificado conforme norma ISO 4017 e classe 12.9, apresenta como principal característica alta resistente a tração, sendo assim, muito utilizado para componentes de sistemas mecânicos e estruturais. Os parafusos da classe 12.9, tem como ligas os elementos químicos citados na tabela 1, e sua dureza está na faixa de 39 - 44 HRC.

Tabela 1. Concentração de elementos de liga de parafuso classe 12.9

% C	% Si	% Mn	% Cr
(0,28 – 0,5)	(0,15 – 0,30)	(0,60-0,80)	(0,80 – 1,10)
% Ni	% Mo	% P	% S
(1,65-2,00)	(0,20-0,30)	(máx 0,0025)	(máx 0,0025)

A fim de determinar a(s) possível(is) causa da falha, foram realizados exames visuais, exames macrográficos, fractográficas, espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e

ensaio de dureza. A Figura 2 mostra os dois parafusos em campo analisado e suas posições na máquina.

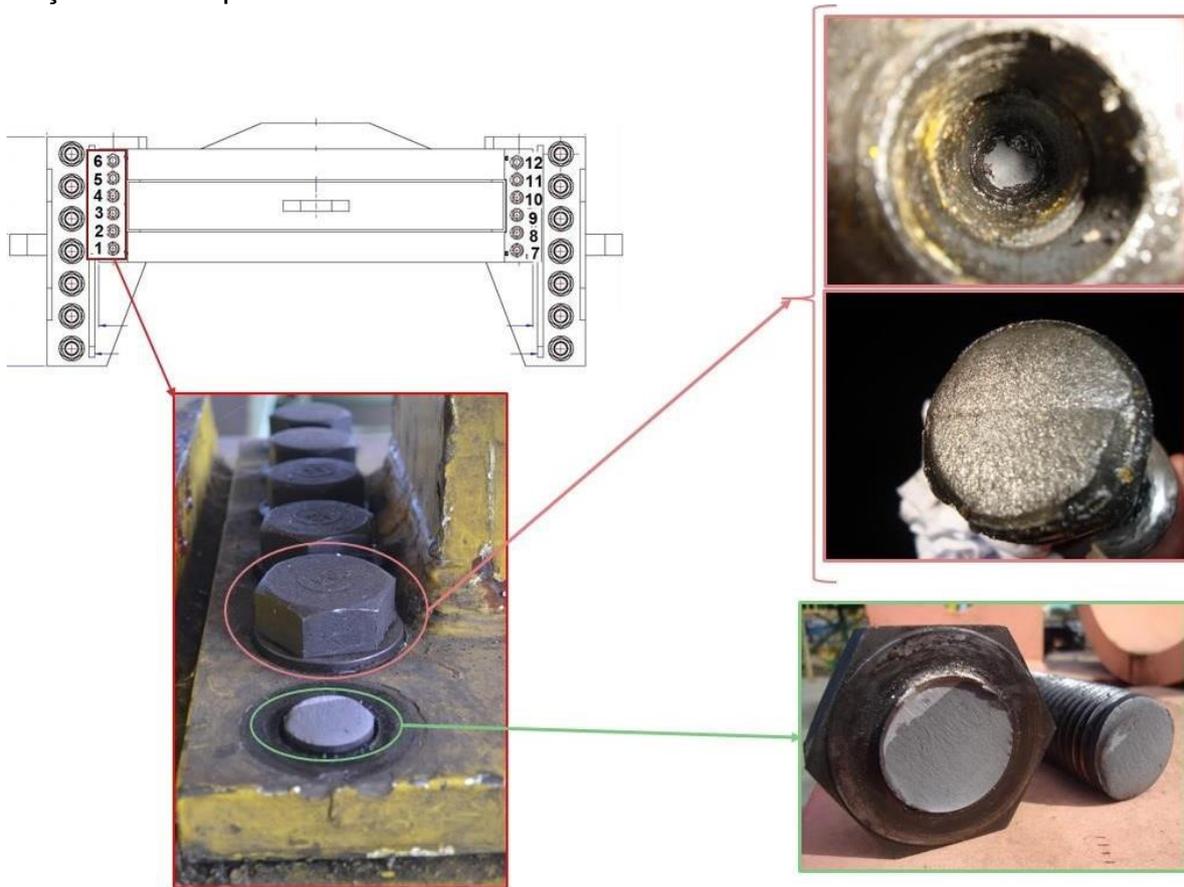


Figura 2. Vista superior da máquina e parafusos danificados.

2.2 Análise de falhas nos parafusos rompidos

2.2.1 Parafuso - P1

O parafuso P1 fraturou entre a cabeça e rosca, utilizando o estereoscópio foi possível observar marcas de praia na superfície da fratura (Figura 3), assim confirmando que o modo de falha foi por esforços cíclicos (fadiga). Através dessas marcas é possível apontar o local do início da trinca que gerou a ruptura final, mostrando também se sua propagação foi a baixa ou a alta carga.

Consideramos que a trinca se propagou por mais de 70% da área da seção transversal do parafuso, de acordo com Geitner e Bloch (2014) é possível determinar que os esforços cíclicos foram de baixa carga, conforme Figura 3 e esquemático da Figura 4.

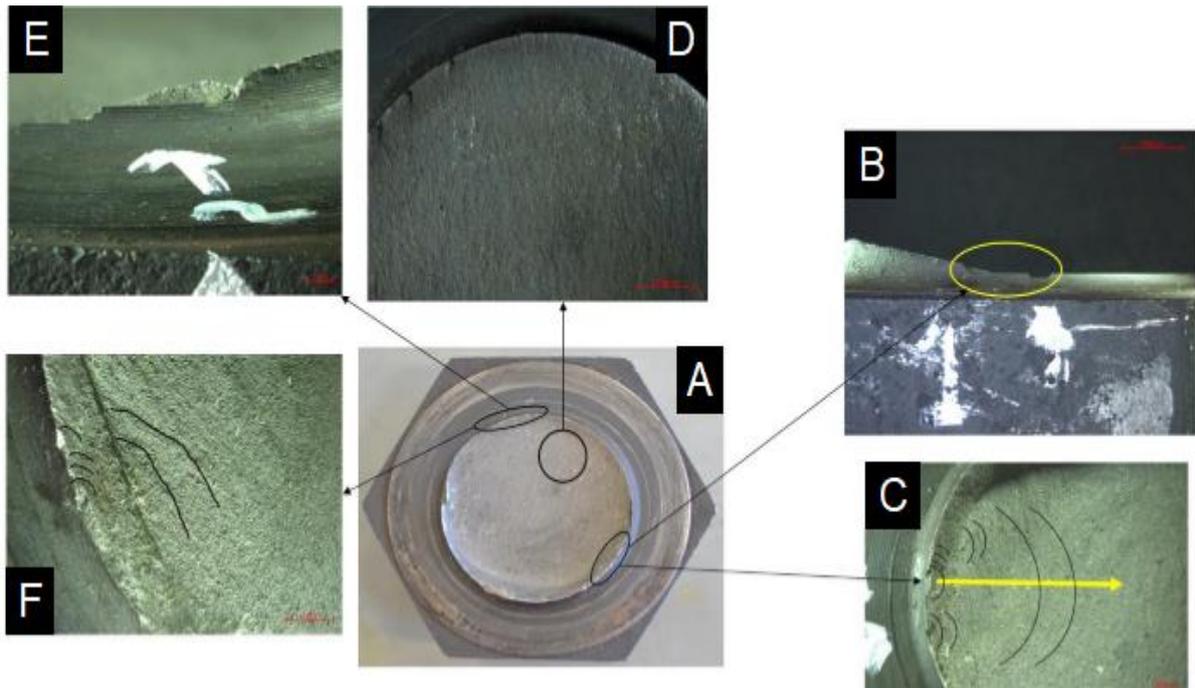


Figura 3. Fractografia da região da fratura e macrografias detalhadas. A) Vista Superior; B) Provável origem primária; C) Propagação da trinca; D) Região da ruptura final; E) Provável origem secundária; F) Propagação da trinca.

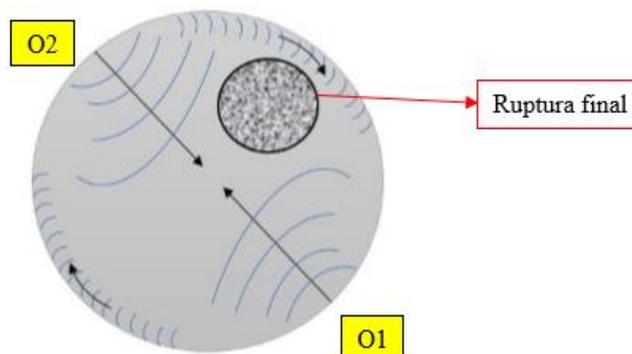


Figura 4. Diagrama esquemático da dinâmica da fratura.

Próximo ao local da nucleação da trinca é observado uma reentrância (Figura 5) das marcas de ferramentas de usinagem. As setas amarelas na Figura 6 apontam essas marcas na face da rosca progredindo a 45° do sentido do raio do parafuso, a partir desta parede usinada por cerca de até 3 mm na direção do raio, tendendo a uma fratura plana.

A Figura 6B trata-se de uma imagem superior da fratura da cabeça do parafuso, nesta imagem é possível ver o caminho que a trinca percorreu. Na região da marca de usinagem vista na Figura 6A, seguindo o perímetro da fratura, é possível observar pequenas reentrâncias com pequenas marcas de catracas (setas amarelas). Fraturas por fadiga na maioria das vezes apresentam múltiplos pontos de nucleação, particularmente sob altas tensões, chamado de marcas de catracas de acordo com Pelliccione, et al (2014).

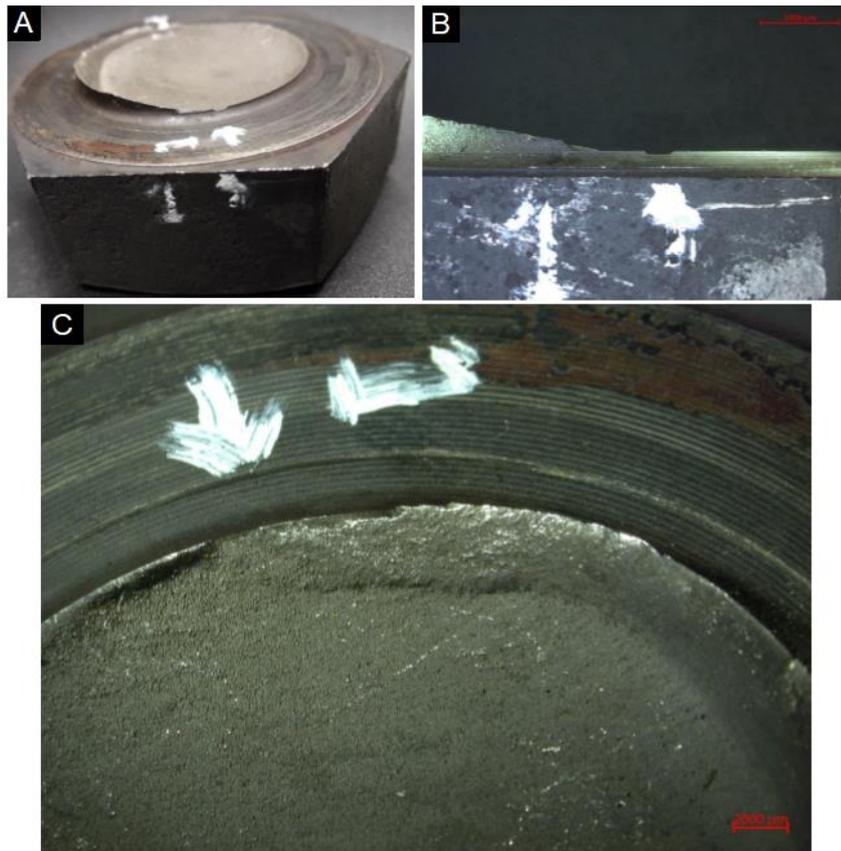


Figura 5. Detalhe na região de origem primária, A) Vista em ângulo; B) Vista frontal (6,3 x de ampliação); C) Vista superior (6,3 x de ampliação).

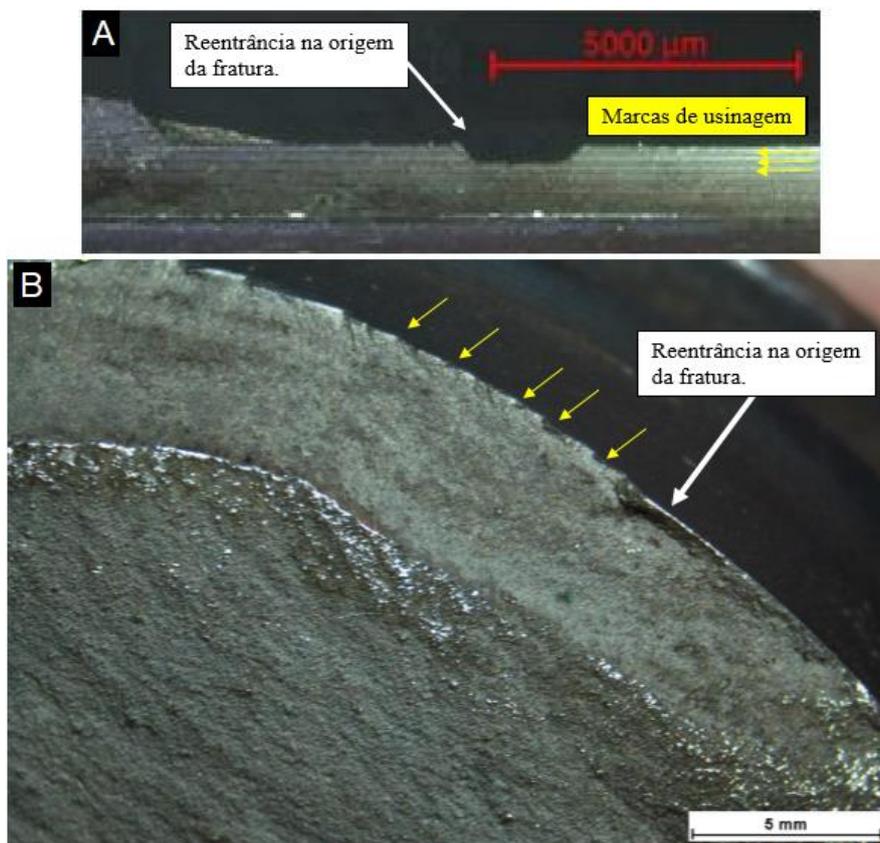


Figura 6. Detalhe da reentrância na provável origem primária da falha. A) Vista lateral da fratura seção da cabeça; B) Vista superior da fratura seção dos filetes do parafuso.

2.2.2 Parafuso - P2

Semelhante análise do parafuso P1 foi realizado com outro parafuso que apresentou falha. Conforme a Figura 7 é possível identificar marcas de praia na superfície da fratura, caracterizando o modo de falha por esforços cíclicos (fadiga).

É possível observar que as marcas de praia cobrem cerca de 40 a 50% da área da fratura, de acordo com Geitner e Bloch (2014) sendo a zona de ruptura maior que a de propagação das trincas a fratura é caracterizada por esforços cíclicos de alta carga. Assim, é possível afirmar, que a tensão aplicada nesse parafuso foi maior que no parafuso P1, então o parafuso P2 se rompeu logo após o rompimento de P1.

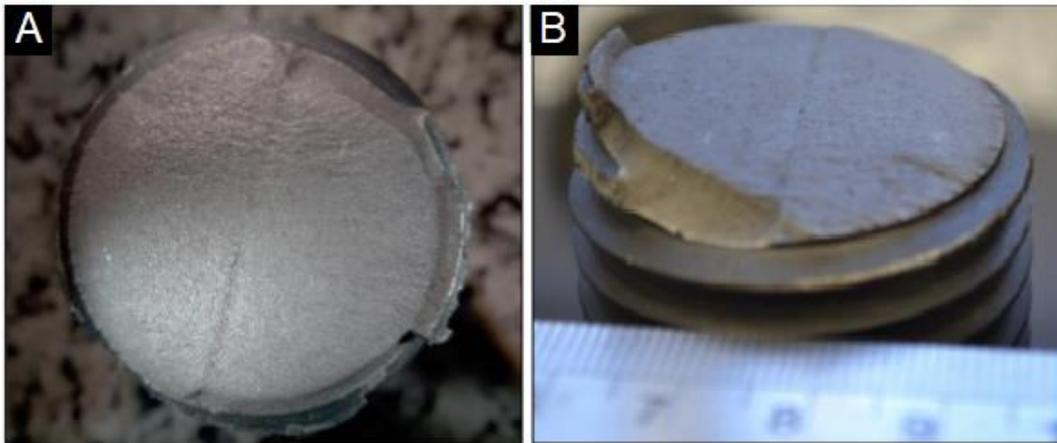


Figura 7. Fractografia do parafuso 02. A) Vista superior; B) Vista lateral.

Na Figura 7A é possível ver uma linha radial, que corta todo o diâmetro do parafuso, e na Figura 7B observa-se que essa linha existe em uma inflexão de planos. Também foi realizado um diagrama esquemático do parafuso P2, para melhor compreensão, conforme a Figura 8.

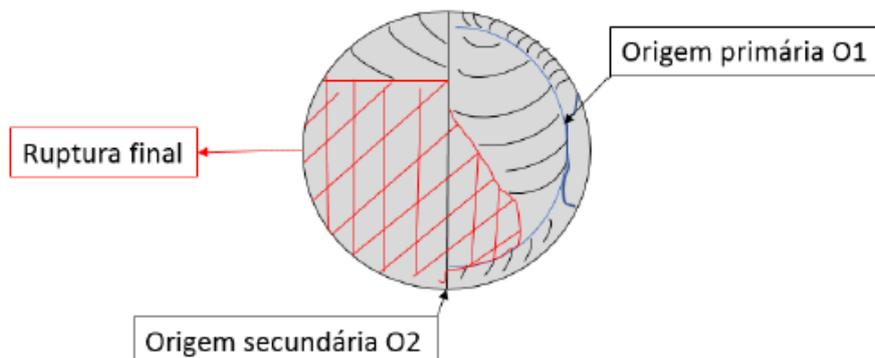


Figura 8. Diagrama esquemático da fratura.

Foram observadas algumas imperfeições nos filetes adjacentes à fratura, conforme a Figura 9, essas imperfeições são provenientes do processo de fabricação do fornecedor. Conforme analisado nesse artigo, ambos os parafusos apresentaram este acabamento na parede dos filetes, também foi observado na transição entre os primeiros fios de rosca e a região cilíndrica, um acabamento insatisfatório na aplicação deste onde o fenômeno fadiga é um fator complicador para o projeto.

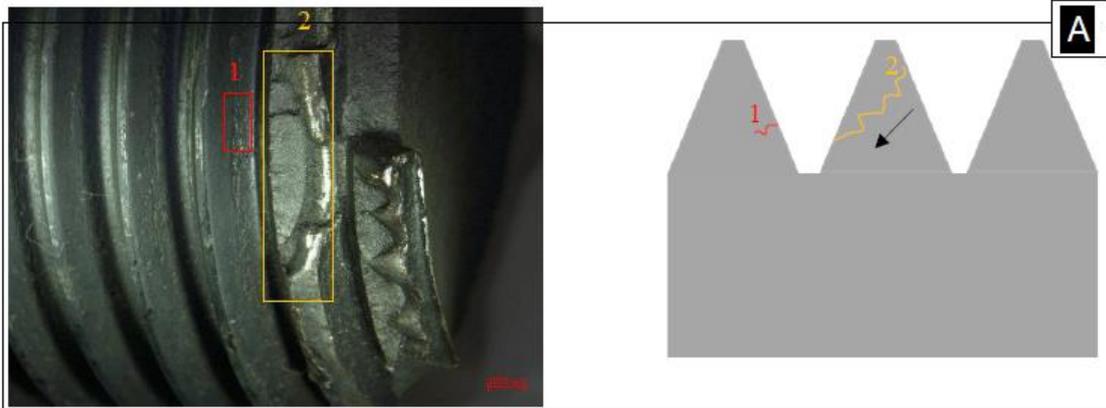


Figura 9. Macrografia do parafuso P2. Detalhe de filete fora da região de fratura onde apresentam defeito de fabricação (indicação 1) e pequena fratura no filete adjacente a fratura principal (indicação 2), ao lado desenho esquemático apresentando o caminho da trinca (indicação 2) e do defeito 1.

2.3 Análise em parafuso novo do mesmo fabricante

A fim de avaliar as peças novas do mesmo fabricante, inspeções e análises foram realizadas através de um microscópio em um mesmo parafuso ISO 4017, M42 da Classe 12.9. Na Figura 10A é possível observar que o parafuso possui as mesmas condições de acabamentos dos parafusos que fraturaram. Foram observados também, danos mecânicos posteriores ao processo de fabricação, não sendo possível afirmar sua origem (Transporte? Acondicionamento? Manuseio?).

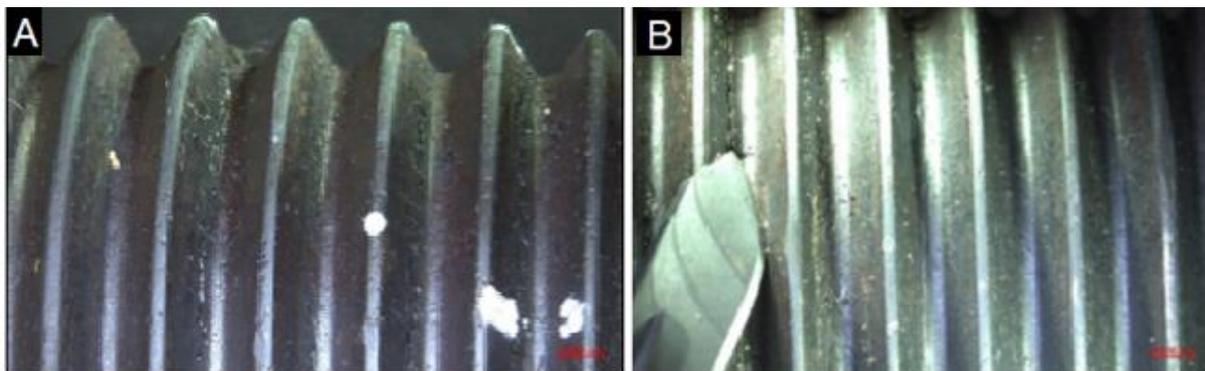


Figura 10. Parafuso do mesmo fabricante. A) danos mecânicos na superfície dos filetes B) marcas de trincas.

Foram observadas na crista do filete marcas similares à trincas, proveniente do processo de fabricação do parafuso. Esse tipo de defeito interfere na vida fadiga da peça, além disso, pode se tornar um caminho preferencial para uma trinca nucleada em outra região. São observados deslocamentos em alguns filetes, provavelmente oriundos do processo de “BLACK OXIDE”, conforme a Figura 11B.

2.4 Análise Metalográfica dos parafusos

Para obter uma melhor compreensão desse fenômeno, foi realizado um corte transversal na amostra P1 (Figura 13), conforme microscopia ótica é observada uma trinca de aproximadamente 400 µm, conforme a Figura 14.



Figura 13- Corte realizado na amostra P1.

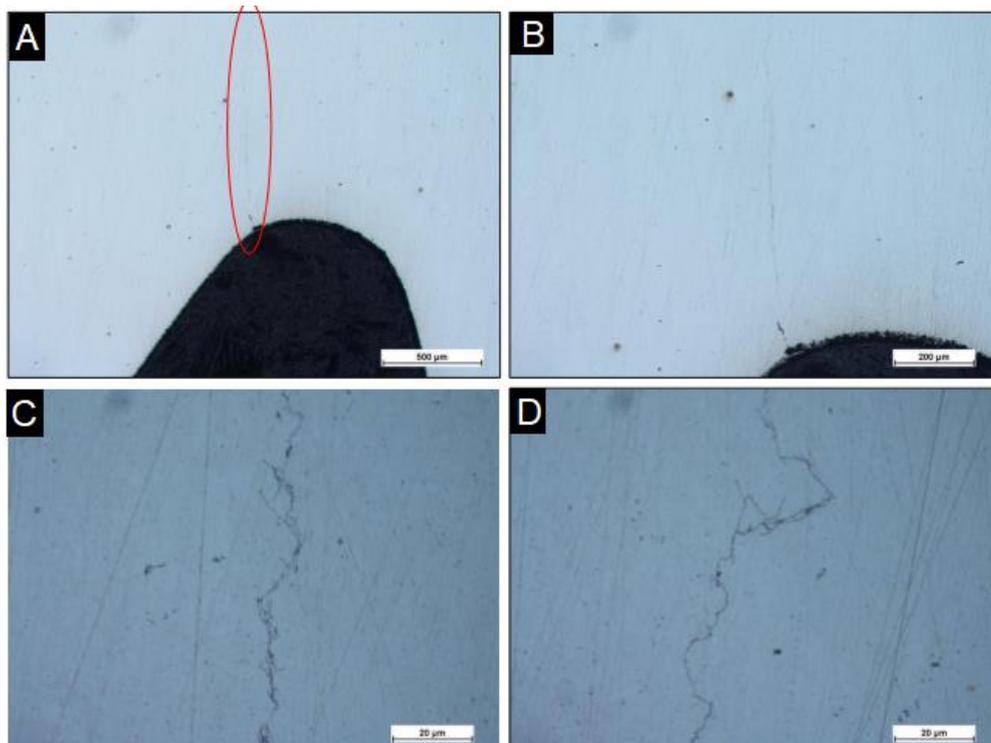


Figura 14. Microscopia sem ataque da seção transversal do parafuso P1 (SEÇÃO A-A); A) Imagem com 50x de aumento; B) Imagem com 100x de aumento; C) e D) Imagem com 1000x de aumento.

A fim de avaliar a microestrutura dos parafusos foi realizado um ataque químico com reagente NITAL 3% e analisado no microscópio. Através da Figura 15 é possível observar que há presença de martensita revenida fina e homogênea. Além disso, verifica-se a propagação da trinca nos contornos de grão.

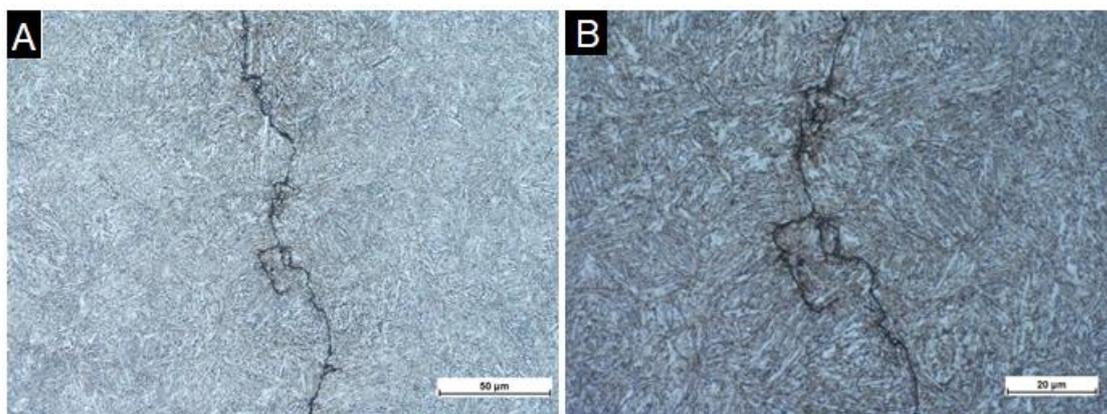


Figura 15. Microscopia com ataque químico Nital 3% da seção transversal da amostra do P1; A) Imagem com 500x de aumento; B) Imagem com 1000x de aumento.

A fim de analisar melhor os filetes do parafuso P2, foram realizados cortes longitudinais ao fio, com a finalidade de se obter acesso à secção transversal semelhante à Figura 13. Através de microscopia ótica, foi encontrado trincas em 100% das cristas do parafuso, essas trincas têm em torno de 400 micrometros, reentrâncias na parede do filete variam na região observada entre 20 e 58 micrometros conforme a Figura 17.

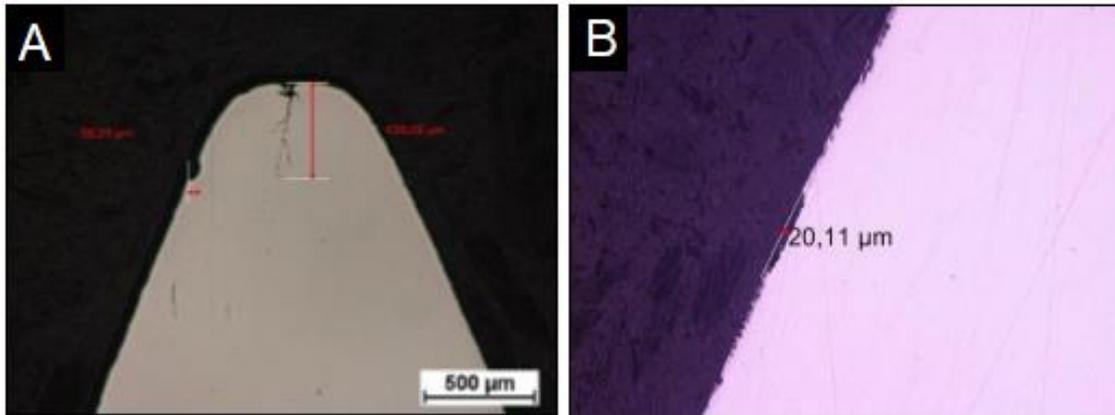


Figura 17. Inspeção micrografica nos filetes do P2, A) Trinca na crista do parafuso P2; B) Reentrâncias na parede do filete.

Foi realizada também, microscopia ótica de parafusos novos. O corte semelhante ao realizado na Figura 16 constata trincas na crista dos filetes, estas trincas são inerentes do processo de fabricação (usinagem). É possível observar que em algumas partes do fundo dos filetes apresentam trincas e reentrâncias, conforme Figura 18.

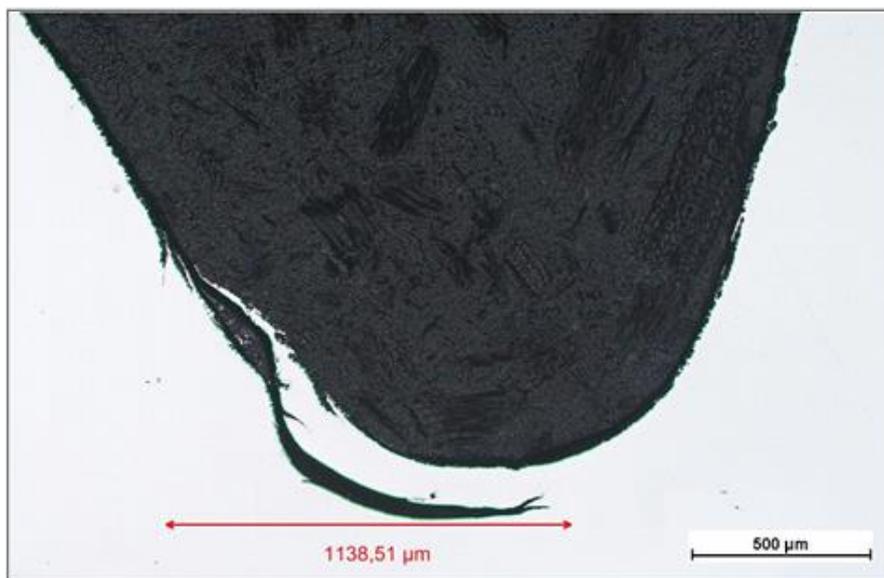


Figura 18. Detalhe na raiz do filete do parafuso novo, destaque das imperfeições inerentes ao processo de usinagem.

Na Figura 19, após ataque com NITAL 2%, a microestrutura revela trinca de morfologia ramificada na crista do parafuso novo.

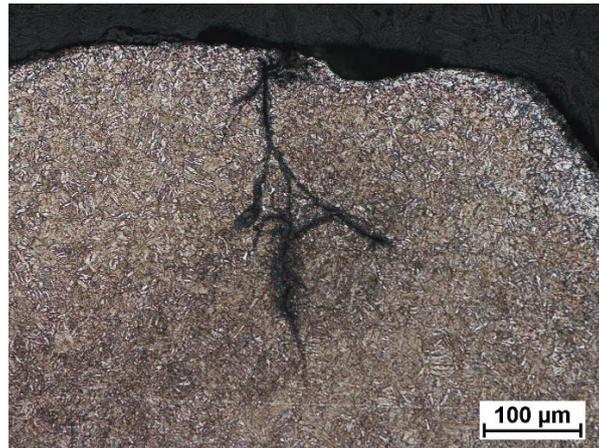


Figura 19. Micrografia da crista do parafuso novo.

Na microscopia eletrônica de varredura, foi observado, que a trinca apresentava ao seu redor uma microestrutura com morfologia diferenciada da região mais afastada da trinca conforme a Figura 20, esta mesma morfologia, foi observado na região da interface entre o substrato de aço e o revestimento de BLACK OXIDE (Figura 20D). Análises complementares de EDS, indicaram que se tratava de composições químicas similares, e a alta porcentagem de oxigênio confirma a presença de BLACK OXIDE dentro da trinca, conforme mostrada nas Figuras 21 e 22.

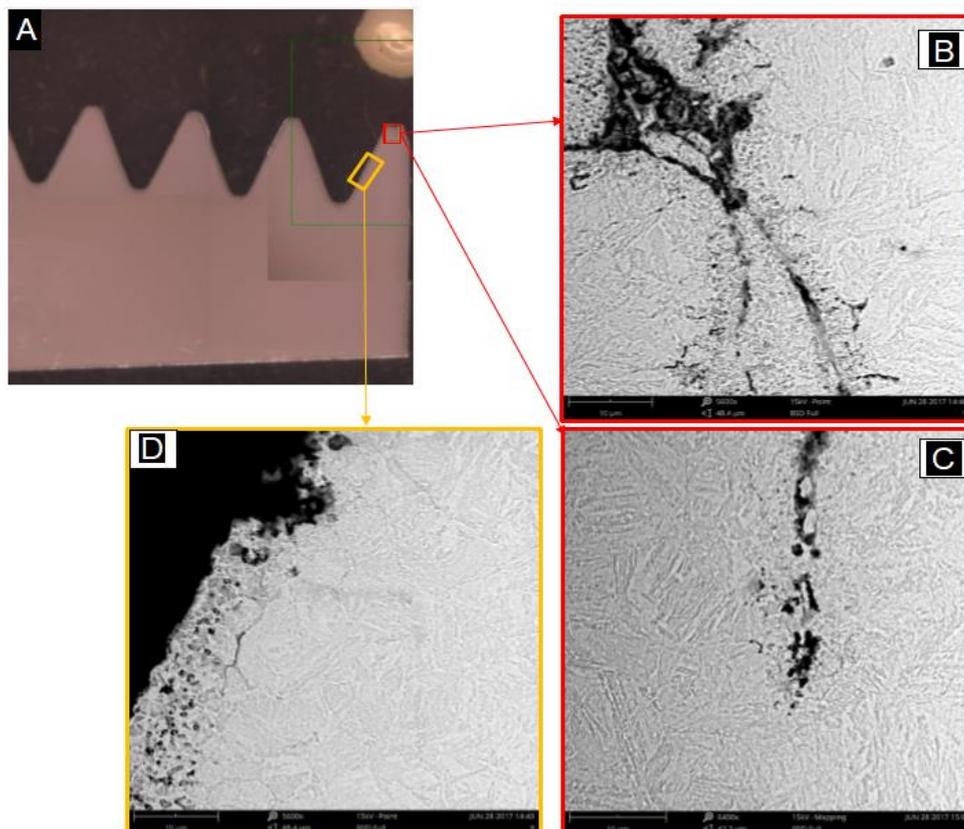


Figura 20. Amostra embutida. B) Parte superior na trinca na crista do filete; C) Ponta da trinca do filete; D) Borda do meio da parede do filete.

Morfologia com composição química semelhantes nas adjacências da trinca e na borda do filete, é um indicativo de que a trinca é anterior ao processo de deposição de oxido negro, pois durante esta etapa de formação do revestimento, este penetrou

na trinca. Na amostra do parafuso novo, observou-se que teve o mesmo comportamento.

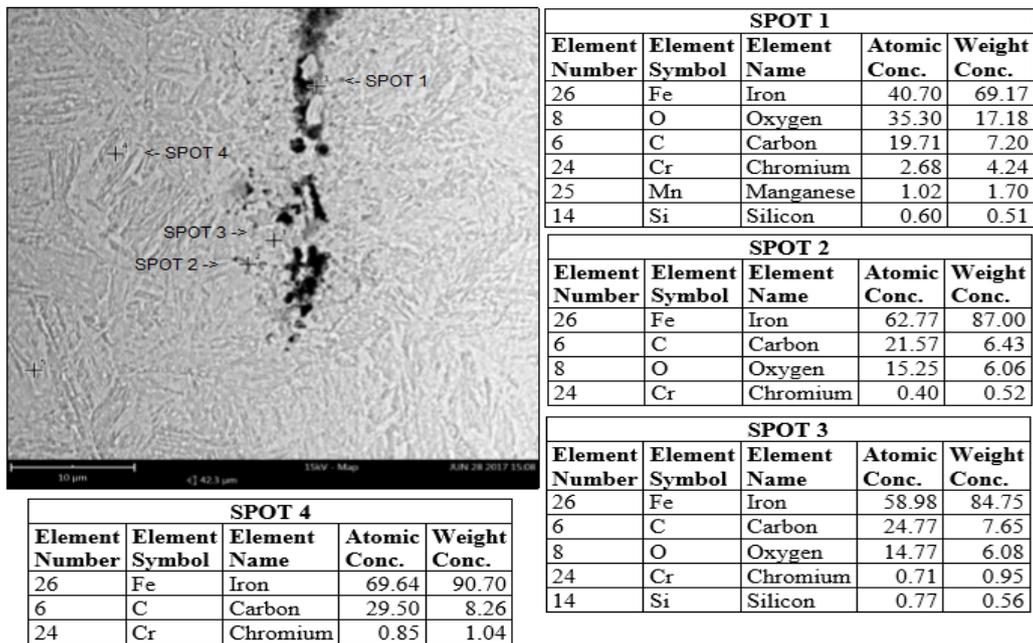


Figura 21. EDS em diferentes regiões da extremidade da trinca.

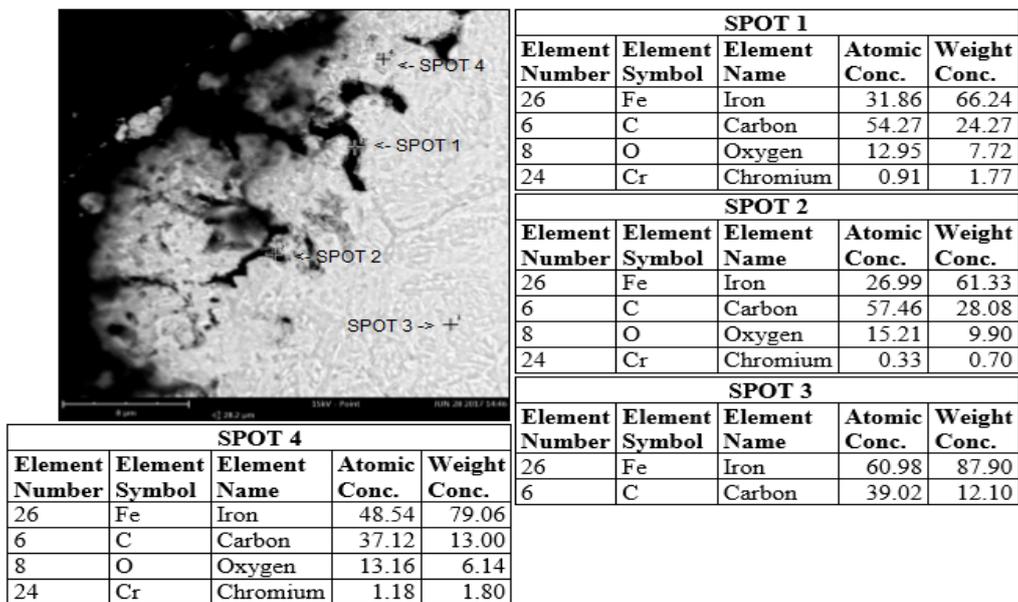


Figura 22. EDS em diferentes regiões da borda do filete.

2.6 Verificação do atendimento a Classe 12.9

Os resultados fornecidos no certificado do fabricante dos parafusos, foram comparados com a especificação requerida para os parafusos da classe 12.9, classe que determina o grau de resistência dos parafusos descritos nesse artigo.

A Tabela 2, tem como objetivo comparar as propriedades mecânicas, e a Tabela 3, comparar as composições químicas. Apenas o valor do percentual de Cromo, no

material, está abaixo do especificado para a grade de aço SAE 4340, porém para parafusos da classe 12.9, o aço deve conter percentual mínimo de 0,30% de Cr.

Tabela 2. Propriedades Mecânicas

	Grau de Resistência	Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HRC)	
Valores esperados	12.9	Min. 1216	Min. 1059	Min. 8	Min. 39	Max. 44
Valores conforme certificados	12.9	1434	1321	13	40/43	

Tabela 3. Composições químicas (%) parafuso SAE 4340

Valores Esperados	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	%Mo
	(0,28 - 0,50)	(0,60 - 0,80)	(máx 0,0025)	(máx 0,0025)	(0,15 - 0,30)	(0,80 - 1,10)	(1,65 - 2,00)	(0,20 - 0,30)
Valores conf. certificados	0,382	0,61	0,006	0,003	0,21	0,7	1,8	0,26

2.7 Ensaio de dureza dos parafusos

Ensaio de dureza foram realizados com o objetivo de comparar os resultados obtidos com os resultados informados no certificado do fabricante desse parafuso, foram escolhidos 3 pontos em diferentes regiões, para a medição da dureza Rockwell. Os resultados obtidos através deste ensaio esta coerente com o certificado fornecido pelo fabricante. Esses valores encontrados estão de acordo com a classe 12.9, onde a faixa de dureza é de 39 - 44 HRC.

3 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos através desse artigo, pode-se comprovar que os parafusos falharam por fadiga e que fatalmente o acabamento superficial proveniente do processo de usinagem diminuiu a vida fadiga dos parafusos. Este acabamento está em um nível rudimentar, sendo recomendado conscientizar o fornecedor sobre a importância desta aplicação e verificar no portfólio do mesmo outro parafuso com melhor acabamento.

Referentes às trincas encontradas nas cristas dos filetes, não deveria afetar a vida fadiga, mas em caso de surgimento de trincas na parede do filete, ao encontrar com as trincas do topo do filete se tornaria um caminho preferencial, assim vindo a fraturar o elemento.

Outro fator importante, observado em um parafuso novo do mesmo fornecedor, é o acabamento superficial, foram observados concentradores de tensão, além do esperado e trincas no fundo e no topo do filete.

REFERÊNCIAS

- 1 Geitner, F. K.; Bloch, H. P. Análise e Solução de Falhas Em Sistemas Mecânicos. 4. ed, 2014; p. 25 - 31.
- 2 Pelliccione, A. S. et al. Análise de Falhas em Equipamentos de Processo. 2. ed., 2014; p. 5 - 8.